



Verschleißmechanismen bei der Bearbeitung vom Grauguß

Volkmar Richter

Fraunhofer-Institut Keramische Technologien und Sinterwerkstoffe, Dresden

Summary

In the paper several aspects of the wear mechanisms of coated hardmetals, ceramics and super-hard materials (CBN) in machining cast iron are discussed, with particular attention being given to high-speed machining of different cast iron grades. The influence of machining parameters, microstructure, composition and mechanical and chemical properties of the cutting tool and the work-piece material on wear are considered.

Keywords

Turning of cast iron, CBN, ceramics, wear, cutting forces, cutting temperature

1. Einleitung

Lamellarer Grauguss findet breite Anwendung im Maschinen- und Fahrzeugbau. Neben günstigen Herstellungskosten zeichnet ihn eine gute Bearbeitbarkeit aus. So lassen sich mit Werkzeugen aus Siliziumnitridkeramik oder kubischem Bornitrid beim Drehen in der Praxis Schnittgeschwindigkeiten bis über 1000 m/min realisieren. Höhere Anforderungen an die Festigkeit oder der Wunsch nach einer Senkung des Gewichts der Bauteile zwingen aber zunehmend zur höheren Legierung des lamellaren Graugusses oder zum Einsatz von vermikularem oder globularem Grauguss. Damit sinken üblicherweise die Standzeiten der Werkzeuge deutlich ab, was zu Effektivitätseinbußen in der Fertigung führt. Es erscheint deshalb interessant, den Verschleißmechanismen der Werkzeuge bei der Bearbeitung verschiedener Graugussarten tiefer auf den Grund zu gehen, um Hinweise zur Verbesserung der Werkzeuge oder zur Modifizierung der Zusammensetzung des Graugusses zu gewinnen.

2. Versuchsdurchführung

Die Untersuchungen zur Standzeit und Verschleißmechanismen der Werkzeuge wurden als Außenlängsdrehen mit Hilfe einer Drehmaschine DFS 2/2 CNC H-645 (Hersteller NILES Drehmaschinen GmbH Chemnitz) durchgeführt, die eine Spindelleistung von 35 kW, eine maximale Hauptschnittkraft von 10 kN und eine Drehzahl von 6 min^{-1} bis 4000 min^{-1} aufweist (Bild 1). Als Werkzeuge kamen die CBN-Sorten DBC 50 und DBN 45 sowie Siliziumnitridkeramik SL100 zum Einsatz, als Gegenwerkstoff dienen GG20, GG25, GGV40 sowie GGG40 und GGG70. Die CBN-Schneidstoffe DBC 50 und DBN 45 weisen einen keramischen Binder auf Basis von TiC(N) auf. Der Volumenanteil der CBN-Phase beträgt bei DBC 50 ca. 50 Vol-% und bei DBN 45 ca. 45 Vol-%. Weitere Eigenschaften von DBC50 zeigt Tabelle 1.

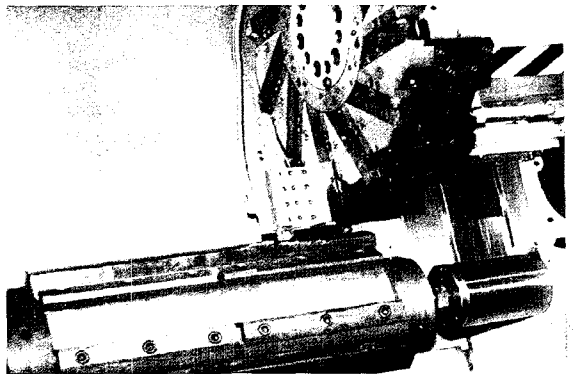


Bild 1: Drehmaschine DFS 2/2 CNC H-645 mit Kistler-Schnittkraftmesser

Gefüge und Eigenschaften der Gusseisensorten werden in Bild 2 und in den Tabellen 2 und 3 beschrieben. Die Schnittgeschwindigkeit wurde zwischen 100 m/min und 800 m/min variiert. Der Vorschub betrug i. a. $f=0,3 \text{ mm}$. Als Schnitttiefe wurden 0,3 mm gewählt. Ergänzend wurden zur besseren Beobachtung von Verschleißerscheinungen auf der Freifläche auch Schnitttiefen von 1 mm gewählt. Die Bearbeitung erfolgte trocken ohne Kühlung.

Der Verschleiß der Werkzeuge wurde mit Hilfe eines Stereomikroskops NIKON SM7-2T (5 bis 100-fache Vergrößerung). Die Größe des Frei- und Spanflächenverschleißes wurde mit dem Messmikroskop MITUTOYO TM505 bei 40-facher Vergrößerung nach ISO 3685 ermittelt (Ablesegenauigkeit $1 \mu\text{m}$). Zur Messung der Kolkentiefe diente ein Lichtschnittgerät am Mess-

mikroskop BK 70x50, Carl Zeiss, Jena. Die Messung der Schnittkräfte erfolgte mit Hilfe einer Dreikomponentenschnittkraftmessvorrichtung für das Drehen der Fa. KISTLER, bestehend aus dem Werkzeughalterdynamometer 9171, dem KISTLER-Ladungsverstärker 5011SN und der Auswertesoftware μ -MUSYCS (integrated measurement & control imc, Berlin).

Die Werkzeugtemperaturen während der Drehbearbeitung wurden mit dem Thermographiesystem (THV900 SW/ST, Herstellerfirma AGEMA) erfasst. Die Infrarotkamera dieses Messsystems wurde dazu im Bearbeitungsraum der Drehmaschine am Werkzeugrevolver montiert und auf das Werkzeug ausgerichtet.

Tab. 1: Mechanische Eigenschaften von DBC50 lt. Hersteller

Dichte (g/cm ³)	4,28
Härte nach Knoop (GPa)	27,5
E-Modul (GPa)	587
Druckfestigkeit (GPa)	3552
Bruchzähigkeit (MPa m ^{1/2})	3,7
Biegebruchfestigkeit (MPa)	225
Thermischer Ausdehnungskoeffizient (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	4,7
Thermische Leitfähigkeit (W m ⁻¹ K ⁻¹)	44

Tab. 2: Chemische Analyse der Gussteile aus GGV40 und GG25 (Herstellerangaben)
Element-Konzentrationen in Masse-%

Element	GGV40	GG25
C	3,65	3,40
Si	2,19	2,17
Mn	0,26	0,62
P	0,033	0,05
S	0,01	0,09
Cr	0,042	0,33
Al		0,005
Mo		0,02
Ti	0,037	0,04
Cu	0,4	0,27
Ni		0,07
Sb		0,03
Mg	0,009	0,004
V		0,01
Sn		0,03
Zn		0,002

Tab. 3: Chemische Analyse der Gussteile aus GG20, GGG40 und GG70

Element-Konzentrationen in Masse-% bzw. ppm

Element [% , ppm]	GG 20	GGG 40	GGG 70
C	3,23	3,55	3,55
Si	1,68	2,46	2,18
Mn	0,49	0,25	0,29
P	0,072	0,025	0,028
S	0,080	0,002	0,007
Cr	0,04	0,04	0,05
Cu	0,14	0,07	1,03
Ni	0,14	0,05	0,07
Mo	0,01	0,01	0,02
Ti	0,01	0,01	0,01
Mg	< 0,01	0,059	0,052
Ce	30 ppm	70 ppm	50 ppm
As	70 ppm	80 ppm	50 ppm
Co	90 ppm	60 ppm	80 ppm
Nb	< 0,01	< 0,01	< 0,01
V	0,01	0,01	0,01

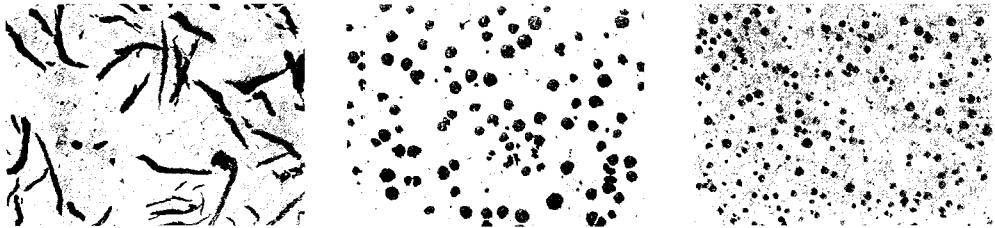


Bild 2: Gefüge der Werkstoffe: GG 20, GGG 70 und GGG 40 (v.l.n.r.)

Die mechanischen Kennwerte der Werkstoffe zeigt Tabelle 4.

Tab. 4: Mechanische Eigenschaften der untersuchten Gussorten (nach DI Dieterle, Halberg-Guß)

Mechanische Eigenschaften	GG 20	GG25	GGV40	GGG 40	GGG 70
R _m [MPa]	200-230	225	450 ¹⁾	428	893
R _{p0,2} [MPa]	185	219	320 ¹⁾	300	540
A ₅ [%]	0,8-1,6	0,2	3 ¹⁾	25	5,0
E ₀ [kN/mm ²]	110	130	145 ¹⁾	173	175
Brinellhärte HB 5/750	185	237	218	160	285

¹⁾ typische Werte

3. Ergebnisse

3.1. Werkzeugverschleiß

Die verschlissenen Werkzeuge wiesen in Abhängigkeit vom bearbeiteten Material und den Schnittbedingungen typische Verschleißmerkmale auf, d. h. auch bei gleichem Verschleißfortschritt traten charakteristische Unterschiede zu Tage. Das Bild einer verschlissenen CBN-Platte, die zur Bearbeitung von vermicularem Grauguss eingesetzt wurde, zeigt Bild 3.

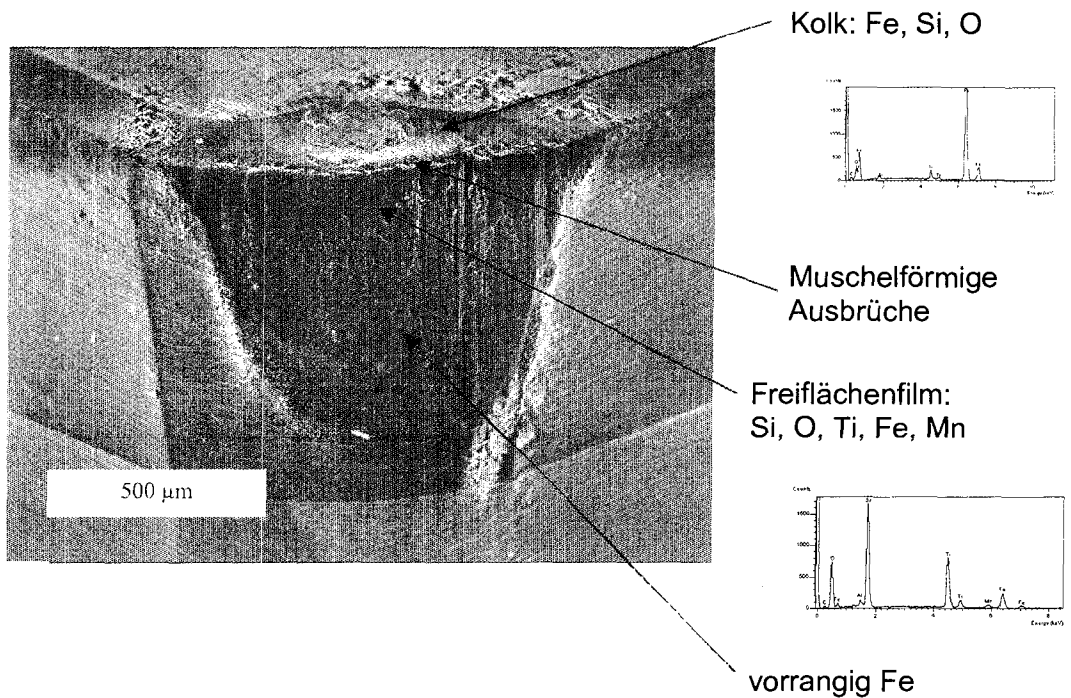
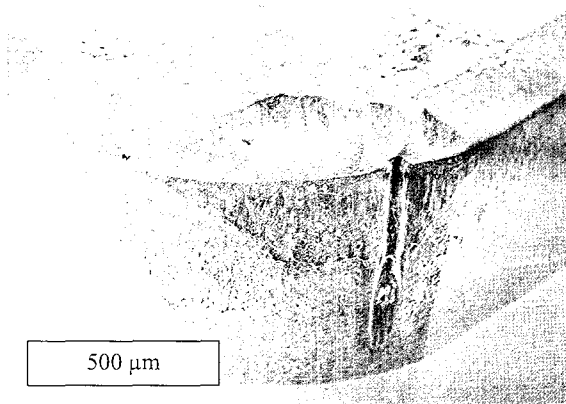


Bild 3: Verschleiß einer CBN-Platte bei GGV40, $v_c/f/a=600/0,3/0,3$, $VB \approx 0,3$ mm (REM)

Typisch für die zur GGV40-Bearbeitung eingesetzten CBN-Werkzeuge ist der muschelförmige Ausbruch der Schneidkante sowie eine sehr schartige Verschleißmarke auf der Freifläche. Im Kontaktbereich lassen sich mit der EDX-Analyse zudem dünne Filme aus Komponenten des bearbeiteten Materials nachweisen. Insbesondere enthalten sie Silizium und Sauerstoff sowie teilweise Mangan. Platten, die unter gleichen Schnittbedingungen gegen GG25 eingesetzt wurden, weisen dagegen auch bei großer Verschleißmarke stets eine scharfe Schneidkante auf (Bild 4).

Spanfläche, Kolk und Freifläche Platte 5



Verschleißmerkmale:

Kolk
 Freiflächenverschleiß
 Kerbverschleiß

Kolkmulde und
 Verschleißmarke stark
 „verklebt“

EDX:

Ü3: Ti, Al, N, O, Si, Fe, Mn

S3: Ti, Fe, Al, O, Si

Ü4: Si, O, Al, Mn, S, Fe, Ti

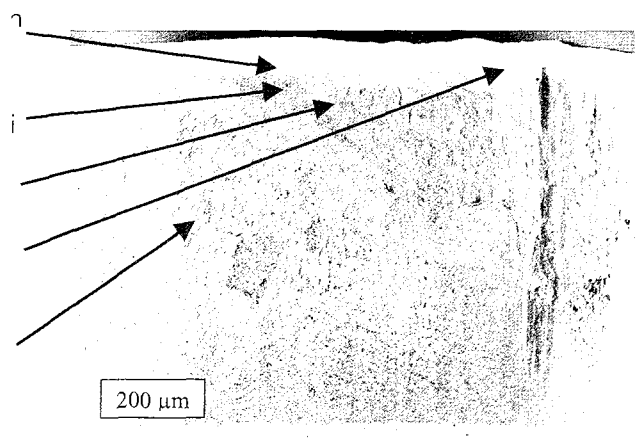
S1: Si, O, Al, Mn, S, Fe

Weißes Korn: Ti, W, Al, C bzw. freie

Kante

Fe

Freifläche DBC50, Platte 5 unter 70°

Bild 4: Verschleiß einer CBN-Platte bei GG25, $v_c/f/a=600/0,3/0,3$ VB » 0,2 mm (REM)

Auch diese Schneidplatten sind im Kontaktbereich mit einem Film aus Gussbestandteilen überzogen, wobei hier der im GG25 enthaltene Schwefel hinzutritt. Die Filmdicke kann mehrere Mikrometer erreichen und ist von Schnittgeschwindigkeit und –zeit abhängig. Dicke Filme bilden sich erst bei höheren Schnittgeschwindigkeiten.

Die zeitliche Änderung der Größe Verschleißmarke VB bei der Bearbeitung von GGV40 bzw. GG25 mit einem CBN-Werkzeug mit Schnittgeschwindigkeiten von 100 bzw. 600 m/min und Schnitttiefen von 0,2 bzw. 1 mm zeigt Bild 5. Das Verhältnis von Verschleißfortschritt auf der Freifläche (VB) und der Spanfläche (Kolk) demonstriert Bild 6.

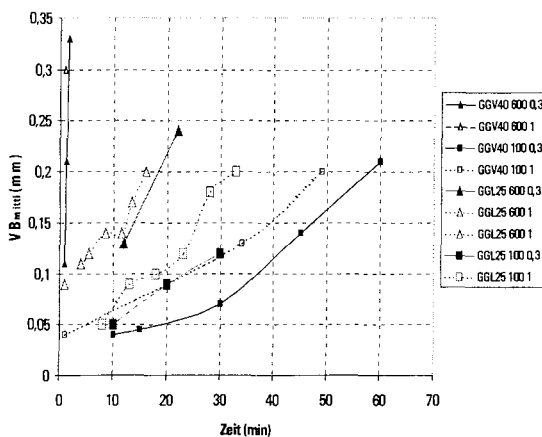


Bild 5: Freiflächenverschleiß von DBC 50 bei GGV40 und GG25

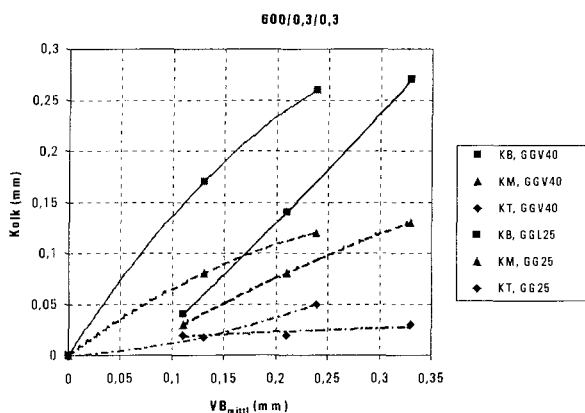


Bild 6: Kolk- und mittlerer Freiflächenverschleiß von DBC 50 bei GGV40 und GG25

In den Bildern 7 und 8 ist die Standzeit bzw. der Standweg verschiedener CBN-Qualitäten beim Drehen von GGV40 dargestellt ($VB_{\text{mittl, zul}}=0,3$ mm).

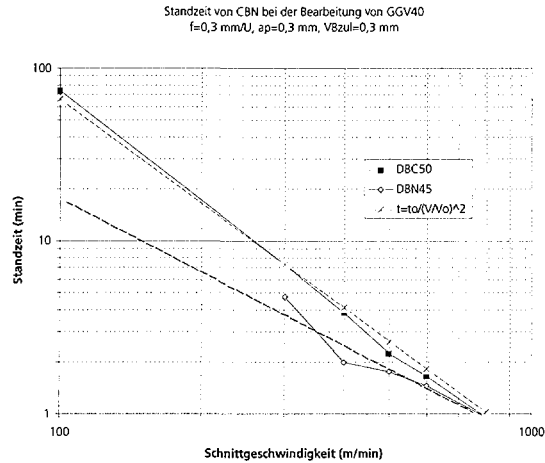


Bild 7: Standzeit und Schnittgeschwindigkeit beim Drehen von GGV40 mit DBC50 und DBN45

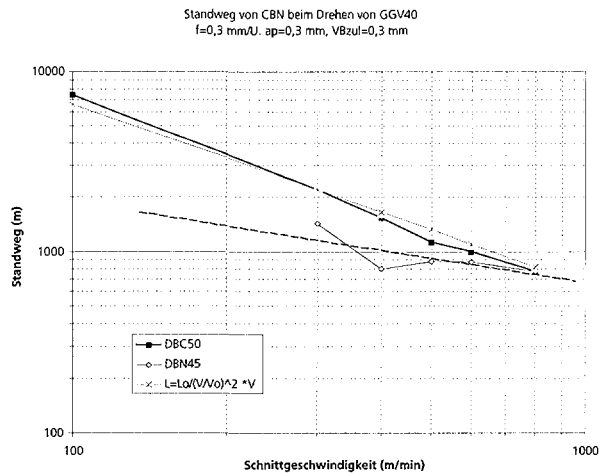


Bild 8: Standweg und Schnittgeschwindigkeit beim Drehen von GGV40 mit DBC50 und DBN45

Es wird deutlich, dass die Standzeit sehr schnell mit der Schnittgeschwindigkeit abnimmt. Der Standweg ist der Schnittgeschwindigkeit umgekehrt proportional. Für die Bearbeitung von G25 gelten ähnliche Beziehungen. Bei $v_c=100 \text{ m/min}$ sind die Standzeiten nahezu identisch, jedoch verläuft der Verschleiß bei höheren Schnittgeschwindigkeiten bei lamellarem Grauguss deutlich langsamer als bei vermicularem (Bild 9).

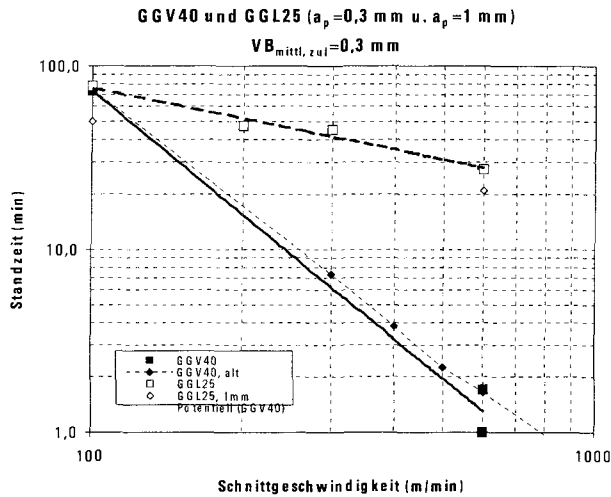


Bild 9: Standzeit und Schnittgeschwindigkeit beim Drehen von GGV40 und GG25 mit DBC50

Die Unterschiede in der Zerspanbarkeit von lamellarem und vermicularem Grauguss treten bei Betrachtung des Standweges besonders deutlich hervor. Während der Standweg bei GGV40 mit der Schnittgeschwindigkeit fällt, kommt es bei GG25 zu einem Anstieg (Bild 10).

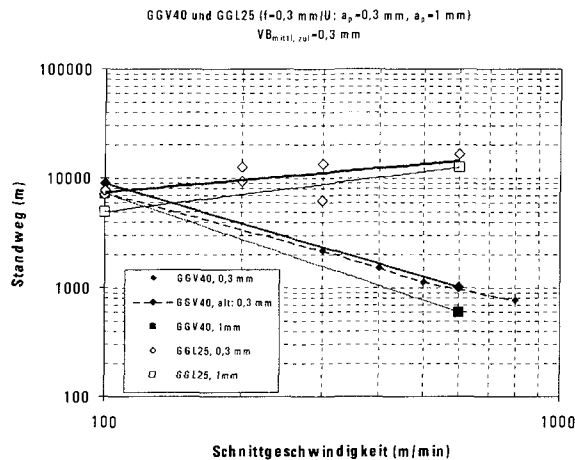


Bild 10: Standweg und Schnittgeschwindigkeit beim Drehen von GGV40 und GG25 mit DBC50

Bei einer Schnittgeschwindigkeit $v_c = 600$ m/min, einem Vorschub $f = 0,3$ mm/U und einer Schnitttiefe von $0,3$ mm und dem Abbruchkriterium $VB_{\text{mittl}} = 0,3$ mm erreicht die CBN-Sorte DBC50 bei GG40 einen Standweg von ca. 1 km, bei GG25 dagegen 16,5 km. Wird die Schnittgeschwindigkeit auf 800 m/min gesteigert, so sinkt der Standweg für GG40 auf 800 m, bei GG25 steigt er auf ca. 18 km. Der Anstieg des Standwegs mit wachsender Schnittgeschwindigkeit ist nicht auf CBN-Werkzeuge beschränkt. Er lässt sich auch für Siliziumnitrid nachweisen (Bild 11).

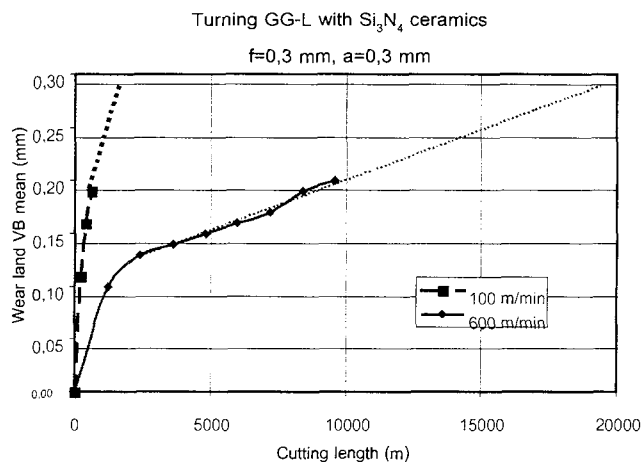


Bild 11: Mittlere Verschleißmarke und Schnittweg beim Drehen von GG25 mit Si_3N_4 -Keramik SL100

Die Verschleißmarkenbreite wächst bei $v_c = 100$ m/min deutlich schneller als bei $v_c = 600$ m/min. Mit einem Abbruchkriterium $VB_{\text{mittl, zul}} = 0,3$ mm ergibt sich bei $v_c = 100$ m/min ein Standweg von 1-2 km und bei 600 m/min von ca. 20 km. Erst mit höherer Schnittgeschwindigkeit erreicht die Keramik akzeptable Standwege. Bei Si_3N_4 reduziert die höhere Schnittgeschwindigkeit den Werkzeugverschleiß sogar noch deutlicher als bei CBN.

Wir können feststellen, dass lamellarer Grauguss GG25 bei Schnittgeschwindigkeiten um 100 m/min ähnlich "aggressiv" auf das Werkzeug einwirkt wie GG40. Mit steigender Schnittgeschwindigkeit lässt sich bei GG25 jedoch eine Zunahme des Standweges von Si_3N_4 - und CBN-Werkzeugen beobachten, während der Standweg bei GG40 drastisch sinkt. Da die Temperatur der Schneide stets kontinuierlich mit der Schnittgeschwindigkeit wächst, nimmt der Schnittweg bei GG-L mit wachsender Schneidentemperatur zu, bei GG-V dagegen ab.

3.2. Schnittkräfte

Die Änderung der Hauptschnittkraft F_c , der Vorschubkraft F_f und der Passivkraft F_p beim Drehen von GG25 bzw. GG40 mit dem Verschleiß zeigen die Bilder 12 bis 14 für verschiedene Schnittgeschwindigkeiten v_c .

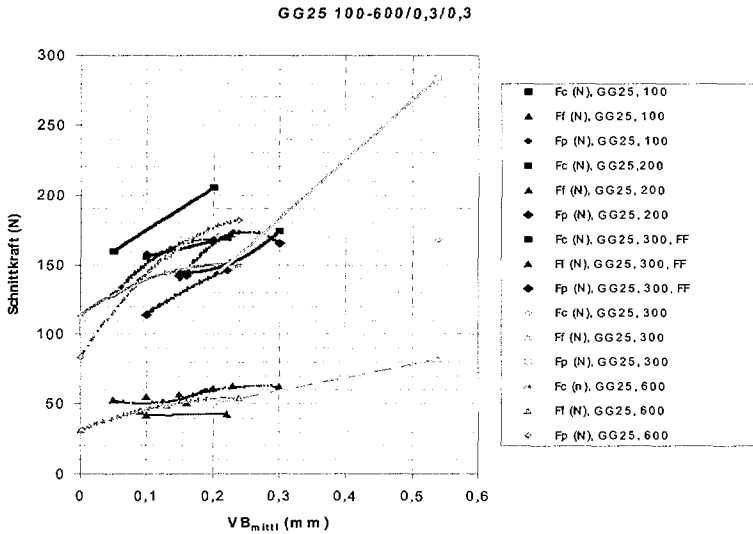


Bild 12: Schnittkräfte von DBC 50 bei GG25 und verschiedenen Schnittgeschwindigkeiten v_c

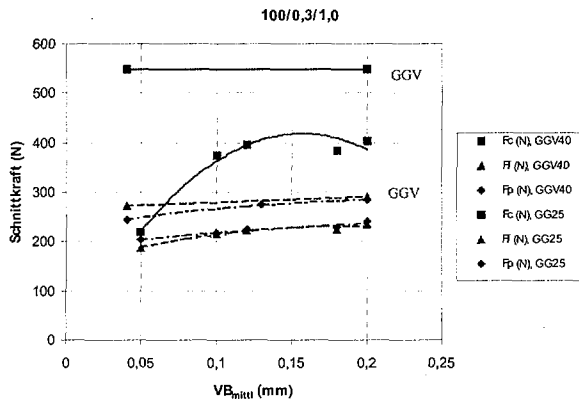


Bild 13: Schnittkräfte bei der Bearbeitung von GGV40 und GG25 mit DBC 50 bei $v_c=100$ m/min

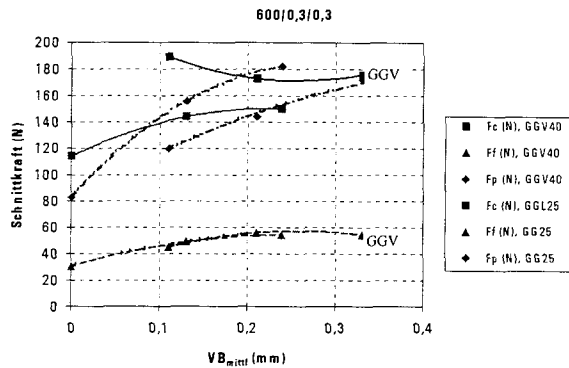


Bild 14: Schnittkräfte bei der Bearbeitung von GGV40 und GG25 mit DBC 50 bei $v_c=600$ m/min

Die Schnittkräfte wachsen mit fortschreitendem Verschleiß stark an. Das trifft insbesondere für Hauptschnitt- und Passivkraft zu (Bild 12). Während bei niedrigen Schnittgeschwindigkeiten Hauptschnitt- und Passivkraft bei GGV40 die beim Drehen von GG25 übertreffen, sind die Schnittkräfte bei höheren Schnittgeschwindigkeiten ähnlich (Bild 13 und 14).

3.3. Werkzeugtemperatur

Die Schneidentemperatur ist bei der Bearbeitung von GG25 und GGV40 mit einem CBN-Werkzeug bei höheren v_c nahezu identisch (Tab. 5)

Tab. 5: Werkzeugtemperatur beim Spanen von Gusseisen mit CBN

v_c m/min	Gusseisensorte	T_{mittl} (°C)	T_{max} (°C)
100	GGV40	628	668
100	GG25	564	602
600	GGV40	781	833
600	GG25	790	823

Die Temperatur der Schneidkante verhält sich also ähnlich wie die Hauptschnittkraft. Nur bei niedrigen Schnittgeschwindigkeiten werden bei GGV40 höhere Schneidentemperaturen beobachtet. Der schnellere Verschleiß der Werkzeuge bei GGV40 bei höheren Schnittgeschwindigkeiten geht also weder mit erhöhten Schnittkräften noch mit einer höheren Schneidentemperatur einher.

3.5. Ergebnisse weiterer Schneidstoffe beim Drehen von GGV40

Ergänzend zu den kubischen Schneidstoffen wurden verschiedene Cermets und beschichtete Hartmetalle getestet, die sich in früheren Versuchen in der Stahlbearbeitung bei Schnittgeschwindigkeiten bis ca. 400 m/min ausgezeichnet bewährt hatten. Beim Drehen von GGV40 mit Schnittgeschwindigkeiten über 200 m/min erreichten sie ähnlich den CBN- oder Siliziumnitridschneidstoffen nur Standzeiten unter 2 min. Einzig einzelne Aluminiumoxidkeramiken erreichten deutlich längere Standzeiten und bei einer Schnittgeschwindigkeit von 500 m/min einen Standweg um 7 km, womit sie alle anderen getesteten Schneidstoffe deutlich übertreffen (Bild 15).

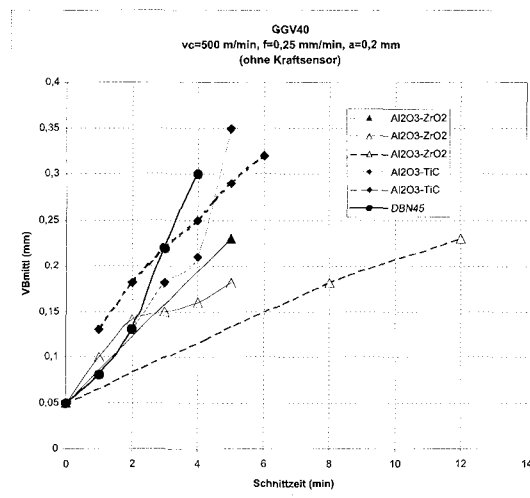


Bild 15: Bearbeitung von GGV40 bei $v_c=500$ m/min mit CBN und verschiedenen Oxidkeramiken

3.6. Bearbeitung von GGG40 und GGG70 mit CBN-Werkzeugen

Während sich GGG40 mit gutem Erfolg mit CBN-Werkzeugen bei Schnittgeschwindigkeiten um 500 m/min bearbeiten ließ, kam es bei GGG70 schnell zu Ausbrüchen der Schneidkante und geringen Standzeiten.

4. Diskussion

Beim Drehen von GG25 und GGV40 mit CBN mit Schnittgeschwindigkeiten $v_c=100 \dots 800$ m/min und $VB_{\text{mittl., zul}}=0,2$ mm wird die Standzeit durch den Freiflächenverschleiß bestimmt. Bei $v_c=100$ m/min ergibt sich bei GGV40 eine höhere Standzeit als bei GG25, bei höherer Schnittgeschwindigkeit ist sie bei GGV40 jedoch deutlich geringer als bei GG25.

Schnittkräfte und Werkzeugtemperatur auf der Spanfläche sind für GG25 und GGV40 bei gleichen Schnittbedingungen nahezu identisch. Die Geometrie der verschlissenen WSP (Ausbildung von Kolk, Freiflächenverschleiß) ist ähnlich. Unterschiede bestehen in der Zeit, bis sich ein bestimmter Verschleißzustand einstellt und der Struktur der verschlissenen Werkzeugflächen.

Beim Drehen von GG25 mit $v_c=100$ m/min ist die Freifläche stark zerklüftet, bei GGV40 relativ glatt. Es bilden sich keine Belegungen auf den Kontaktflächen des Werkzeugs. Bei $v_c=600$ m/min kommt es bei GGV40 zu Mikroausbrüchen der Schneidkante und zur Ausbildung einer zerklüfteten Freifläche, während diese bei GG25 glatt erscheint. In beiden Fällen bilden sich auf den Schneidplatten Schichten aus Werkstückbestandteilen (Fe, Si, Mn, Ti, Mg, S) und Sauerstoff, deren Zusammensetzung lokal und zeitlich stark variiert. Die Schichten sind beim Drehen mit höheren Schnittgeschwindigkeiten (> 200 m/min) bei GG25 dicker und kompakter und enthalten Schwefel. Bei GGG40 konnten gute Werkzeugstandzeiten auch bei hohen Schnittgeschwindigkeiten erzielt werden, obwohl der Schwefelgehalt ähnlich wie bei GGV40 sehr niedrig ist.

Schwarze Keramik ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$) ist in Standzeit und Verschleißbild dem CBN-TiC-Schneidstoff sehr ähnlich. „Reine“ Aluminiumoxidkeramik erreicht bei GGV und v_c um 500 m/min höhere Standzeiten als CBN; die Schneidkante zeigt kein „Chipping“. Auch bei den beiden Keramiken kommt es zu einer starken Belagbildung auf den Kontaktflächen.

5. Schlussfolgerungen

Die unterschiedliche Verschleißrate von CBN bei der Bearbeitung von GG und GGV ist ein Effekt der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung. Der Unterschied kann jedoch nicht durch unterschiedliche Schnittkräfte oder unterschiedliche Schneidentemperaturen erklärt werden. Es wurden keine Anzeichen dafür gefunden, dass die Verschleißrate primär durch chemische Reaktionen (mit der Ferritphase etc.) oder durch die Phasenumwandlung von CBN

bestimmt wird. GGG40 mit einer überwiegend ferritischen Matrix konnte sogar ausgesprochen gut mit CBN bearbeitet werden.

Mit steigender Schnittgeschwindigkeit nehmen beim Drehen von GGV mit CBN Ausbrüche der Schneidkante sowie Riefen und Mikrobrüche im Verschleißmarkenbereich zu, was eine mechanische Überlastung andeutet. Bei der Bearbeitung von GGG70 ist diese Überlastung eindeutig. Die mechanische Zerstörung der Schneidkante könnte durch auftreffende harte Teilchen als Abrasion oder Schockeinwirkung bzw. als Folge einer zyklischen Belastung entstehen.

Die bei GG mit der Schnittgeschwindigkeit rückläufige Zerklüftung der Freifläche deutet auf eine Veränderung der Eigenschaften der abrasiven Bestandteile und/oder ihrer Einbindung in der Matrix sowie einer schützenden Wirkung der Schicht hin. Für Schwefel ist ein positiver Einfluss auf Werkzeugstandzeit beim Spanen von Stahl und Grauguss bekannt, wobei für die Wirkung des Schwefels in der Literatur verschiedene Mechanismen diskutiert werden (Bildung von Schutzfilmen, Veränderung der Einbindung harter Phasen, Verbesserung des Spanbruchs). Man darf annehmen, dass die sich ausbildenden Schichten den Verschleiß bremsen, trennen sie doch die Werkzeugoberfläche von abrasiven Bestandteilen der bearbeiteten Werkstoffe. Ob sie aber für den prinzipiellen Standzeitunterschied in der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung von GG25 und GGV40 verantwortlich sind, bleibt offen.

Für die GGV-Bearbeitung mit Schnittgeschwindigkeiten um 500 m/min bringen Al_2O_3 -Keramiken deutliche Standzeitverbesserungen gegenüber CBN (3 bis 7-fach, trocken), erreichen aber nicht die Standzeiten der GG-Bearbeitung.

Danksagung

Die Arbeiten zur Untersuchung der Werkzeugverschleißmechanismen bei der Bearbeitung von vermicularem Grauguss wurden unterstützt durch:

Adam Opel AG, AUDI AG, BMW AG, DeBeers Industriediamanten Deutschland GmbH, DaimlerChrysler AG, Scania CV AB, Eisenwerk Brühl GmbH, Halberg Guß GmbH und Sintercast GmbH.

Die Schneidentemperatur ermittelte Herr Dr. G. Kirchhoff vom FhG-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik in Dresden. Herrn Prof. Dr. Brenner und Herrn Dr. Luft vom IWS gilt Dank für die stetige Förderung der Arbeiten. Herrn Dipl.-Ing. Dieterle danke ich für die Untersuchung der GGG-Gusswerkstoffe.